

På dronefotoet ses 210 millioner år gamle sø-sedimenter ved Carlsberg Fjord i Østgrønland. Sedimenternes tværsnit er blotlagt her. Geologien varierer hovedsageligt mellem røde og lilla muddersten. Til højre i fotoet kan man ane tre forskere som små sorte streger.
Foto: Jesper Milàn

SOLSYSTEMETS UDVIKLING GEMT I GRØNLANDS STEN

Geologiske lag i Østgrønland kan gøre os klogere på Solsystemets udvikling tilbage i tid. Lagene gemmer på klimasvingninger skabt af tyngdekraftpåvirkning mellem Jorden, Mars og andre planeter.

Om forfatteren

Malte Mau er uddannet geolog fra Aarhus Universitet og ph.d. i geologi fra Københavns Universitet med fokus på tidsperioden Sen Trias i Østgrønland. Malte Mau er bestyrelsesmedlem i Dansk Geologisk Forening og arbejder som geolog i en rådgivende ingeniørvirksomhed.
malte-mau@hotmail.com

Studiet af klimasvingningerne i Østgrønland, beskrevet i denne artikel, er udført i samarbejde med geologen Lars B. Clemmensen (professor emeritus ved Københavns Universitet) og den amerikanske forsker Dennis V. Kent som en del af et større studie af sedimenterne i Østgrønland.

Tyngdekraften styrer alle bevægelser i Solsystemet. Når planeterne i vores Solsystem bevæger sig rundt om Solen, trækker de alle sammen i hinanden med tyngdekraften. Gennem meget lang tid ændrer denne gensidige påvirkning både formen på planeternes baner rundt om Solen samt planetaksernes hældning og retning (samlet kaldet orbitale parametre). Ved at lave modeller af planeternes bevægelser kan forskere beregne, hvordan planeterne i Solsystemet har påvirket hinanden tilbage i tid, og hvordan de i sidste ende har påvirket Jordens orbitale parametre og klima.

Beregninger af planeternes bevægelser tilbage i tid er en vigtig del af grundforskningen indenfor både astrofysik og geologi. Det giver nemlig mulighed for at finde ud af, hvordan Solsystemet har udviklet sig gennem tid, og om der tidligere har eksisteret planeter, som vi ikke kender til i dag. Solsystemets udvikling har også stor betydning for geologiske modeller af Jordens klimaændringer både tilbage og frem i tid.

Modeller nærmer sig deres grænse

Den første beregning eller model af Solsystemets udvikling tilbage i tid blev foretaget af den franske matematiker Urbain Le Verrier i

1856. Modellen blev baggrund for Milankovitch-teorien, som for første gang viste sammenhængen mellem Jordens klima og ændringer i Jordens orbitale parametre, der er drivkraften bag istider. Siden dengang er beregningerne blevet mere præcise. Især brugen af computerberegninger har forlænget modellerne langt tilbage i tid. I dag er astrofysikere faktisk nået så langt med beregningerne af Solsystemets udvikling, at de har fastlagt planeternes bevægelser og påvirkning af hinanden tilbage til cirka 42 millioner år før nu.

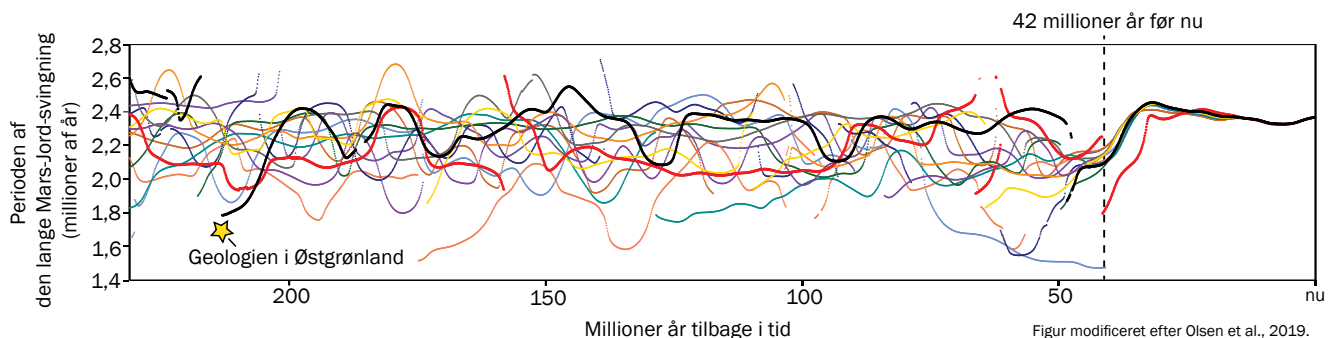
Desværre er man ved at nå grænsen for, hvor langt tilbage i tid, man



På billedet ses Malte Mau (t.v.) og Lars Clemmensen i felturens lejr ved Carlsberg fjord i Østgrønland 2018, hvor dataindsamlingen blev foretaget. Foto: Octávio Mateus

kan forlænge modellerne. Der er især begrænsninger i den algoritme, man bruger til beregningerne, men også i såkaldte kaotiske effekter. En kaotisk effekt kan for eksempel være en komet eller en asteroide, som man ikke kender til i dag, men som for mange millioner år siden har bevæget sig tæt på en planet og påvirket planetens orbitale parametre med dens tyngdekraft. Det er en effekt, man ikke kan tage højde for i beregningerne af Solsystemets udvikling. Det giver derfor en stor usikkerhed – eller kaos – i modellerne.

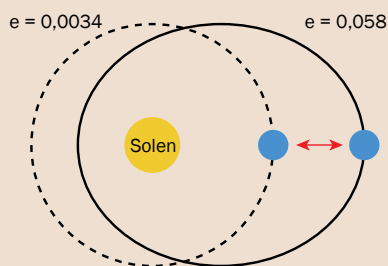
Den store usikkerhed og begrænsning i beregningerne af astronomiske modeller kunne altså tyde på, at astrofysikerne er hjælpeløst strandet i videreudviklingen af disse modeller. Her kommer geologien ind i billedet. Jeg har nemlig påvist, at planeten Mars for 210 millioner år siden har efterladt sig spor i Grønland efter tyngdekraftpåvirkning mellem Mars og Jorden. Det samme har andre forskere gjort andre steder på Jorden og til andre tidspunkter. På den måde kan vi lære noget om, hvordan Mars og Jorden har bevæget sig til-



Figuren viser 13 forskellige astronomiske modeller af en af modulation af en Jordens orbitale parametre. Helt specifikt viser modellerne perioden af den lange Mars-Jord-cyklus skabt af tyngdekraftpåvirkning mellem Mars og Jorden, og hvordan den har udviklet sig gennem de seneste 200 millioner år.

I dag er perioden af denne orbitale cyklus 2,4 millioner år, men tilbage i tid ændrer perioden sig på grund af påvirkninger mellem Jorden, Mars og de andre planeter i Solsystemet. Modellerne er nogenlunde enige om perioden af denne cyklus tilbage til omkring 42 millioner år siden, men længere tilbage i tid er usikkerheden stor, hvilket viser sig ved at de 13 modeller på figuren afviger fra hinanden. Før dette tidspunkt er modellerne så usikre, at de alle sammen giver forskellige resultater. Det er her geologien i Østgrønland kan hjælpe ved at give data for perioden af denne Mars-Jord-cyklus tilbage i tid. Det giver et holdpunkt til modellerne af Solsystemets udvikling. De omkring 210 millioner år gamle sedimenter i Østgrønland viser en periode på 1,7 millioner år markeret med en stjerne på figuren.

Jordens orbitale parametre

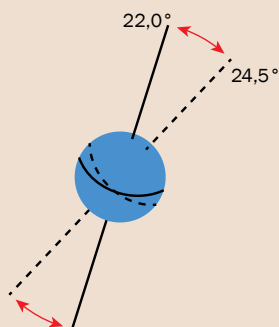


Excentricitet (100.000 år)

Jordens orbitale parametre består af de tre fundamentale parametre excentricitet, aksehældning og aksepræcession, som har en cyklicitet på mellem 100.000 år og 26.000 år. Man skal forestille sig, at parametrene svinger mellem to yderpunkter i en cyklus, hvor en cyklus svarer til at gå fra det ene yderpunkt til det andet og tilbage igen. Ændringer i Jordens orbitale parametre forårsager ændringer i mængden af solenergi Jorden modtager, som resulterer i langvarige klimasvingninger på Jorden.

Excentricitet

Jordens bane omkring Solen er ikke en perfekt cirkel, men er svagt elliptisk med varierende excentricitet. Jordens excentricitet, e , varierer mellem 0,0034 og 0,058, hvor 0 svarer til en cirkel. Ved en excentricitet på 0,058 er forskellen i solenergi mellem punktet længst fra Solen (aphelium) og punktet tættest på Solen (perihelium) på cirka 25 %. Jordbanens excentricitet varierer fra det ene yderpunkt til det andet



Aksehældning (41.000 år)

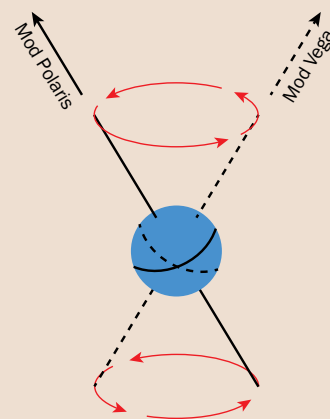
yderpunkt og tilbage igen med en periode på omkring 100.000 år. Cyklussen på 100.000 år har stor effekt på Jordens klima og har tilsyneladende forårsaget svingningen mellem istider og mellemistider de seneste 900.000 år. Derfor har en istid typisk en længde på 100.000 år, inden klimaet slår over i en varm mellemistid, som vi har i dag.

Aksehældning

Jordens akse hælder i forhold til Jordens baneplan. I dag har Jordens akse en hældning på 23,4 grader, men denne hældning er ikke vedvarende. Aksehældningen varierer nemlig mellem en hældning på 22,0 grader og 24,5 grader, hvor en cyklus varer omkring 41.000 år. Det er aksehældningen, der gør, at der er årstidsvariationer på Jorden. Det er især en vigtig klimadrivkraft på breddegrader over 60.

Aksepræcession

Jordens akse hælder ikke kun, den præcesserer også. Man skal forestille sig, at Jordens akse peger i



Aksepræcession (26.000 år)

en bestemt retning i rummet, og at denne retning langsomt bevæger sig i en cirkel. Lige nu peger Jordens nordpol mod stjernen Polaris, også kaldet Nordstjernen, men om cirka 12.000 år vil Jordens akse have bevæget sig næsten en halv omgang i cirklen, og nordpolen vil i stedet pege mod stjernen Vega. Det tager Jordens akse omkring 26.000 år at beskrive en fuld cirkel. Men da Jordens bane om Solen også præcesserer, dog i den modsatte retning, dannes to præcessions-perioder på omkring 19.000 år og 23.000 år, der påvirker klimaet og kan aflæses i geologiske lag.

Ved præcession af Jordens bane skal man forestille sig, at Jordens bane om Solen danner et baneplan, som langsomt "slingrer" en smule med Solen i baneplanets ene brændpunkt. Set langs Jordens baneplan vipper Jordens bane altså langsomt frem og tilbage i forhold til Solens position, hvilket påvirker Jordens aksepræcession.

bage i tid og bruge disse geologiske resultater til at forbedre beregninger af Solsystemets udvikling.

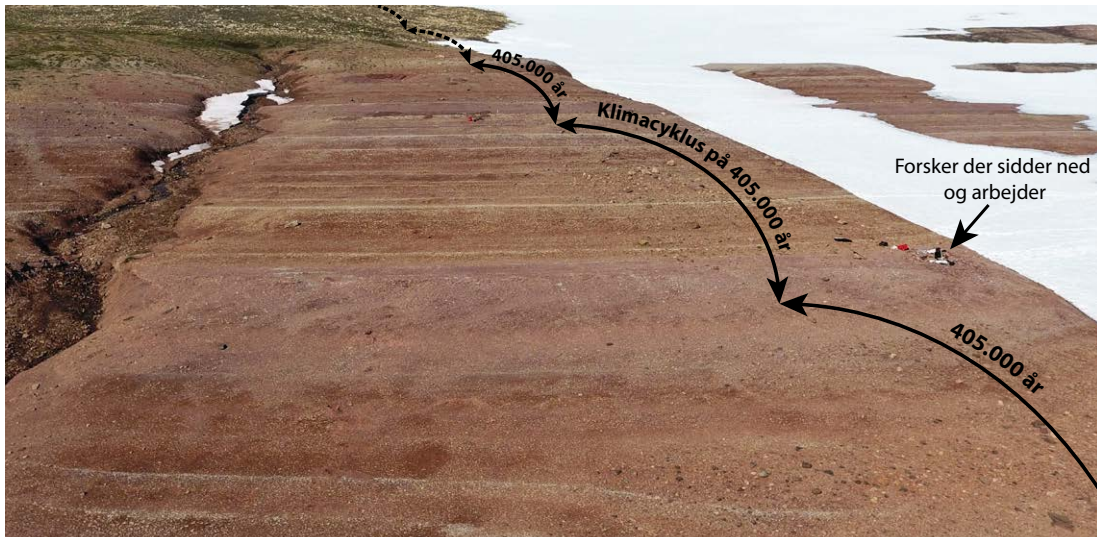
Sø-aflejringer i Grønland blev påvirket af klimaet

Søer er generelt virkelig gode til at sladre om klimaændringer. De er nemlig begrænset til et lille område, og de påvirkes i stor grad af temperatur og regnfald ved for eksempel

indtørring og udvidelse eller skift i aflejringsprocesser. Derfor bruges sø-aflejringer ofte som indikator for klimaændringer.

I Carlsberg Fjord i Østgrønland finder man sedimentære lag i flotte røde og lilla farver. Disse lag er dannet i en enormt stor sø for omkring 210 millioner år siden. Dengang lå området længere sydpå, omkring

hvor Spanien ligger i dag. Desuden var klimaet generelt meget varmere end i dag på grund af en høj koncentration af atmosfærisk CO_2 . Det varme klima betød, at søen i Østgrønland oftest var udtørret, og der blev hovedsageligt aflejret rødt mudder. I perioder med lidt fugtigere klima blev der aflejret lilla mudder. I de mest fugtige perioder blev søen fyldt op af vand, som aflejrede

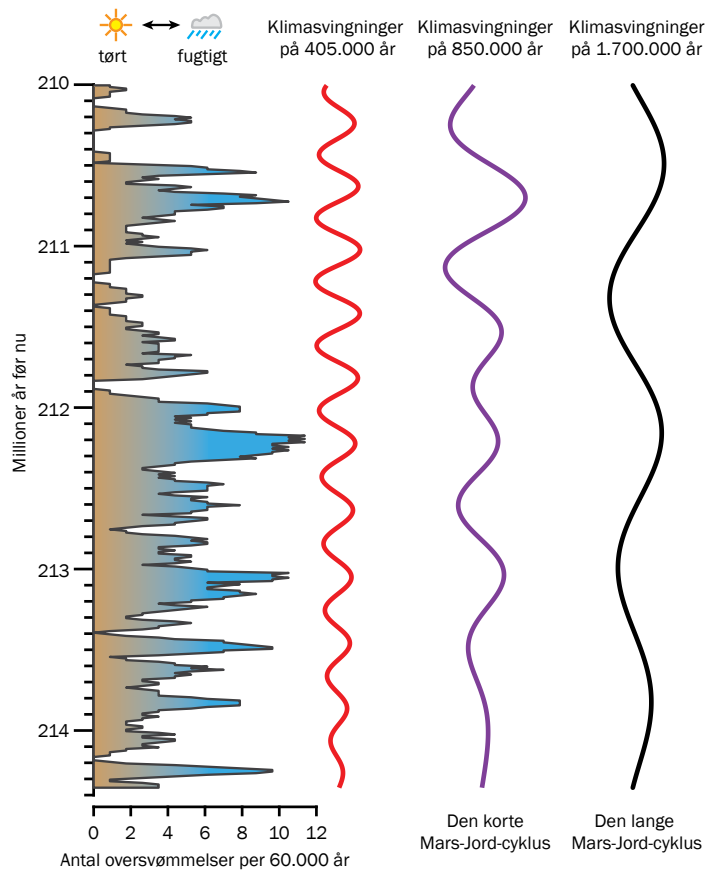


På dronefotoet ses 210 millioner år gamle sø-sedimenter, hvis tværsnit i dag er blotlagt. Geologien varierer hovedsageligt mellem røde og lilla muddersten, hvor rød repræsenterer de perioder, hvor søen for det meste har været udtørret, og lilla repræsenterer mere fugtige perioder. De røde og lilla lag gennemskæres også af tynde mørkerøde og lysegrå lag af siltsten, som repræsenterer perioder, hvor søen blev oversvømmet. Der er en vertikal højdeforskel på 15 meter mellem de tykke lilla lag på billedet, hvilket svarer til en klimacyklus på 405.000 år. Foto: Jesper Milån.

et tyndt lag af røde eller grå siltsten. Det giver i dag et stribet mønster af røde, lilla og grå lag, som sladrer om de klimasvingninger, søen har været udsat for.

Den sø, der eksisterede i Østgrønland for 210 millioner år siden, var altså stærkt påvirket af klimaet, som skiftede mellem tørt og fugtigt. Disse klimasvingninger blev skabt af ændringer i Jordens orbitale parametre, som ændrer den mængde solenergi, Jorden modtager og derved det globale klima. Ved at analysere disse klimasvingninger i Østgrønland lykkedes det mig at påvise klimasvingninger relateret til både præcession af Jordens akse, hældningen af Jordens akse og excentriciteten af Jordens bane rundt om Solen.

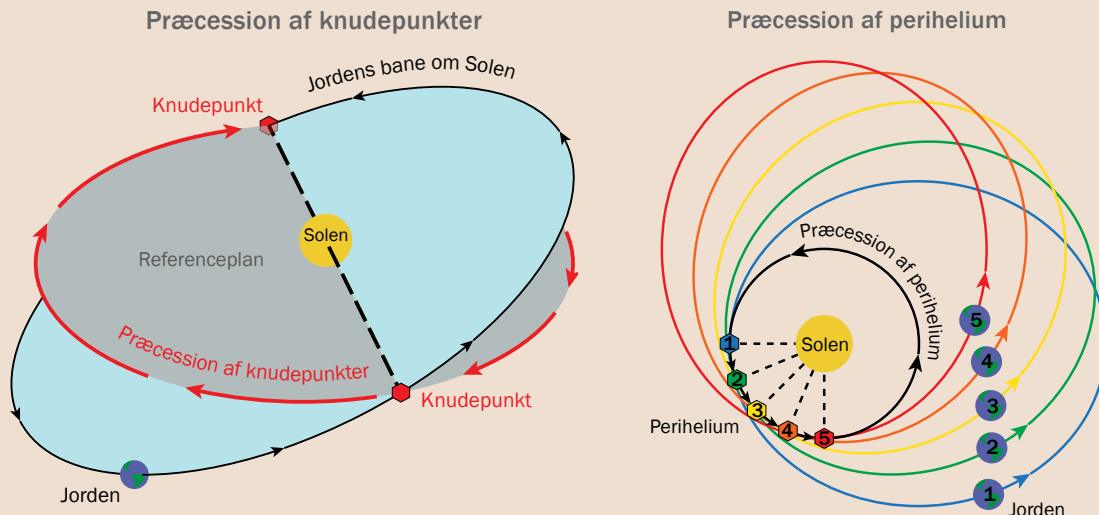
Lange klimasvingninger med en periode på 405.000 år er særligt fremtrædende i de røde og lilla lag, når de ses på afstand. Denne klimacyklus skabes af cykliske ændringer i Jordens baneform og er relateret til Venus og Jupiters tyngdepåvirkning af Jorden. Jupiter har en meget stor masse, og derfor er perioden af netop denne 405.000 års cyklus stabil gennem tid. Denne Venus-Jupiter-cyklus har altså en periode på 405.000 år både i dag og for 210 millioner år siden.



Siltstens-lag i den gamle sø i Østgrønland fortæller en historie om klimavariationer, da de repræsenterer perioder, hvor den udtørrede sø blev oversvømmet af vand. Ved at tælle, hvor mange siltstens-lag der er indenfor en periode af 60.000 år, har jeg dannet en klimakurve. Jo flere siltstens-lag, der er inden for en periode af 60.000 år, desto mere fugtigt har klimaet været.

Den røde kurve viser klimasvingninger på 405.000 år dannet af Venus' og Jupiters påvirkning af Jorden. Den lilla kurve og sorte kurve viser klimasvingninger på henholdsvis 850.000 år og 1.700.000 år, som blev skabt af Mars' tyngdekraftpåvirkning af Jorden aksehældning og excentricitet (Se boksen på næste side).

Mars' påvirkning af Jordens orbitale parametre



Jordens orbitale parametre består af de tre fundamentale parametre; excentriciteten af Jordens bane, Jordens aksehældning og aksens retning. Der findes dog en række orbitale parametre, som hovedsageligt ses ved, at en af de tre fundamentale parametre moduleres i amplitude. Det vil sige, at de justerer på styrken af de tre fundamentale parametre på en cyklisk måde. Dette kan genkendes som meget lange klimasvingninger i geologiske lag.

I min forskning har jeg især fokuseret på to langvarige klimasvingninger, som jeg her kalder for henholdsvis den korte Mars-Jord-cyklus og den lange Mars-Jord-cyklus. Begge skabes ved tyngdekraftpåvirkning mellem Mars og Jorden. Disse to svingninger er særligt interessante at studere, fordi usikkerheden i deres periode tilbage i tid er meget stor. Ved at påvise perioden af disse Mars-Jord-cykler som klimasvingninger i den geologiske tidsserie, kan jeg altså give astrofysikerne et holdepunkt i deres modeller af Solsystemets udvikling.

Den korte Mars-Jord-cyklus har i dag en periode på

1,2 millioner år. Den skyldes en amplitudemodulation af Jordens aksehældning. Jordens bane om Solen kan ses som et baneplan, som skærer et andet referenceplan. De to punkter, hvor Jordens bane krydser referenceplanet, kaldes for knudepunkterne, og disse knudepunkter præcesserer rundt om Solen. Mars har ligeledes en præcession af knudepunkterne. Jordens og Mars' præcession af knudepunkterne påvirker hinanden og skaber en amplitudemodulation af Jordens aksehældning og en klimatisk cyklus på 1,2 millioner år.

Den lange Mars-Jord-cyklus har i dag en periode på 2,4 millioner år. Den skyldes en amplitudemodulation af Jordens excentricitet. Helt præcist skabes denne cyklus, fordi det punkt på Jordens bane, der er tættest på Solen (perihelium) præcesserer. Man skal altså forestille sig, at Jordens ellipsoformede bane roterer rundt om Solen, og at dette perihelium flyttes hele tiden. Mars' elliptiske bane om solen har også en præcession af perihelium. Påvirkningen mellem Jordens og Mars' præcession skaber i dag en klimatisk cyklus på 2,4 millioner år.

Mars-Jord-klimasvingninger i Grønland

Meget lange klimasvinger træder tydeligt frem ved at plotte, hvor mange oversvømmelser, altså siltstens-lag, man kan tælle, hver gang der er gået 60.000 år. Jo flere siltstens-lag, der er indenfor en periode af 60.000 år, desto mere fugtigt har klimaet været. Først og fremmest træder en Venus-Jupiter-klimasvingning med en periode på 405.000 år tydeligt frem. Det er dog også muligt at spotte endnu længere klimasvingninger på 850.000 år og 1.700.000 år. Disse

to lange klimasvinger er specielt interessante, fordi de fortæller os om, hvordan Mars og Jorden har påvirket hinanden for 210 millioner år siden. Geologien viser, at den korte Mars-Jord-cyklus havde en periode på 850.000 år i stedet for en periode på 1.200.000 år, som den har i dag. Desuden viser geologien, at den lange Mars-Jord-cyklus havde en periode på 1.700.000 år i stedet for en periode på 2.400.000 år, som den har i dag.

De oldgamle perioder af de to Mars-Jord-cykler er altså mar-

kant forskellige fra de nutidige perioder. Men på et punkt ligner de dog hinanden: De to Mars-Jord-cykler havde nemlig et forhold på 1:2 (850.000:1.700.000 år) lige nøjagtig som i dag (1.200.000:2.400.000 år). Det er en vigtig detalje, da nogle astronomiske modeller har forudsagt et forhold på 1:1 mellem perioderne. På baggrund af data fra Grønland kan jeg dog konstatere, at en ændring af forholdet mellem perioderne fra 1:2 til 1:1 ikke fandt sted for 210 millioner år siden. Denne information kan altså hjælpe med at

Udover information om fortidens klima byder søaflejringerne ved Carlsberg Fjord også på spændende dinosaurfund. Til højre ses spor fra en såkaldt Grallator, hvilket er en gruppe af små tre-tåede rovdinosaurer, som gik på to ben. Foto: Octávio Mateus.



Rekonstruktion af ny dinosaur-art opdaget i søaflejringerne ved Carlsberg fjord baseret på fund af to kranier. Den nye dinosaur-art med navnet *Issi Saaneq* (kold knogle på grønlandsk) var en stor planteædende dinosaur tæt beslægtet med den europæiske Plateosaurus. Figur efter Beccariet al., 2021.



forbedre modeller af Solsystemets udvikling. Et forhold på 1:1 mellem de to Mars-Jord-cykluser kan dog have fundet sted både før og efter perioden for 210 millioner år siden, hvilket måske kan blive eftervist af geologiske undersøgelser andre steder i verden.

Utroligt nok er der ingen astronomisk model, der viser den samme

periode af de to Mars-Jord-cykluser, som geologien i Grønland. Den model, der kommer tættest på mine geologiske resultater, er en model med navnet La2010d beregnet af den franske astrofysiker Jacques Laskar. Det viser, hvor stor usikkerhed der er i de astronomiske modeller tilbage i tid, og hvor meget geologien kan hjælpe med at forbedre modellerne. Mit håb er,

at min forskning kombineret med andre forskeres studier af klimasvingninger kan bane vejen for nye og forbedrede modeller af Solsystemets udvikling i fremtiden.

Hvem ved, måske kan klimasvingningerne i Grønland endda være med til at påvise ukendte planeter og bidrage til at teste Einsteins relativitetsteori.

Yderligere læsning
Resultaterne omtalt i denne artikel: Mau, M., Kent, D. V., & Clemmensen, L. B. (2022). Planetary chaos and inverted climate phasing in the Late Triassic of Greenland. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(17), e2118696119.

Om Milankovitch-teorien: Siewertsen, B. (2007). Tre cykler, sommer og en istid. *Aktuel Naturvidenskab nr. 3/2007*

Om lange klimasvingninger i Nordamerika og modeller af Solsystemets udvikling: Olsen, P. E., et al. (2019). Mapping solar system chaos with the Geological Orrery. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(22), 10664-10673.

Om geologien i Jamesonland og om nogle af de fundne fossiler: Clemmensen et al. (2016). The vertebrate-bearing Late Triassic Fleming Fjord Formation of central East Greenland revisited: stratigraphy, palaeoclimate and new palaeontological data. *Geological Society, London, Special Publications*, 434(1), 31-47.

Læs Naturvidenskabelig Bachelor

Fordyb dig i medicinal biologi, molekylær biologi, matematik, fysik, kemi eller miljøbiologi. Du kan f.eks. arbejde med at undersøge miljøskadelige stoffer i havet, bedre diagnosticering og behandling af sygdomme, antibiotikaresistente bakterier, plastforurening eller måske er du bare nysgerrig på hvordan man udvikler nye naturvidenskabelige metoder og teorier?

RUC
Roskilde Universitet

Arbejd på tværs af naturvidenskabelige felter.

Arbejd med topforskere i moderne laboratorier.

Uddannelsen kan tages på både dansk og på engelsk, hvor studiemiljøet er mere internationalt.

Læs mere her:

